

팔라듐 코팅된 편광 유지 광섬유를 이용한 편광 상이 배치 구조 기반 광섬유 수소 센서의 개발

(Development of Optical Fiber Hydrogen Sensor Based on Polarization-Diversity Loop Configuration Using Pd-Coated Polarization-Maintaining Fiber)

노태규* · 김영호 · 이용욱**

(Tae-Kyu Noh · Young-Ho Kim · Yong-Wook Lee)

Abstract

In this study, we propose a fiber-optic hydrogen sensor using a polarization-diversity loop configuration composed of a polarization beam splitter, two quarter-wave plates, and a polarization-maintaining fiber coated with palladium whose thickness is ~400nm. One transmission dip of the output interference spectrum of the proposed sensor, chosen as a sensor indicator, was observed to spectrally shift with the increase of the hydrogen concentration, and the sensing indicator showed a wavelength shift of ~2.48nm at a hydrogen concentration of 4%. Except for a hydrogen concentration of 4%, the response time of the proposed sensor was measured as less than 12.5s and did not show significant dependence on the hydrogen concentration. In particular, the proposed fiber hydrogen sensor is more durable and highly resistant to external stress applied on a transverse axis of an optical fiber, compared with other hydrogen sensors based on side-polished fibers or fiber gratings.

Key Words : Hydrogen Sensor, Polarization-Diversity Loop Configuration, Polarization-Maintaining Fiber

1. 서 론

최근 수소 에너지는 분산 전력 시스템과 교통 분야에서 재생 가능한 에너지로서의 잠재성으로 인해 화석연료의 대체 에너지원으로 많은 관심을 받고 있다. 하지만 무색, 무취의 인화성 가스인 수소는 높은 확산율과 빠른 화염 전파 속도를 가지며, 연소 범위도 4.0~74.2 vol. %로 메탄(5.0~15.0 vol. %)에 비해 훨씬 넓다. 특히 수소는 분자의 크기가 작기 때문에 수소 용기에서의 누출이 쉽게 일어난다. 따라서 수소 누출로 인한 폭발 위험을 감소시키기 위해 수소에 대해 높

* 주저자 : 부경대학교 전기공학과
** 교신저자 : 부경대학교 전기공학과 부교수
* Main author : School of Electrical Engineering,
Pukyong National University
** Corresponding author : School of Electrical
Engineering, Pukyong National
University, Associate Professor
Tel : 051-629-6323, Fax : 051-629-6305
E-mail : yongwook@pknu.ac.kr
접수일자 : 2012년 10월 18일
1차심사 : 2012년 10월 24일
심사완료 : 2013년 2월 14일

은 민감도와 빠른 검출 속도를 갖는 다양한 수소 센서들이 제안되어 왔다. 여러 가지 수소 센서 중 광섬유 수소 센서(optical fiber hydrogen sensor)는 실리카(silica) 재질의 광섬유를 사용함으로써 누출된 수소가 누전이나 불꽃에 의한 발화로 발생 가능한 폭발 사고의 우려가 없고, 광섬유를 통해 광 신호를 빠르게 전달 가능하므로 장거리 원격 탐지가 가능하다. 이러한 장점들로 인해 최근 연구되고 있는 광학 기반 수소 센서들은 다양한 광섬유를 사용하는 광섬유 수소 센서들이 주를 이루고 있다.

기존의 광섬유 수소 센서들은 주로 광섬유 브래그 격자(fiber Bragg grating: 이하 FBG)나 장주기 광섬유 격자(long-period fiber grating: 이하 LPFG)에 팔라듐(palladium: 이하 Pd)이나 텅스텐 산화물(tungsten trioxide: 이하 WO_3)과 같은 수소 반응 물질을 코팅(coating)하여 센서부로 사용하였다[1-5]. 수소 반응 물질 중 Pd는 수소를 흡수하는 특성이 있고, 상온에서 수소 흡수 시 부피가 약 900배 팽창한다[6]. Pd 코팅된 광섬유 격자가 수소에 노출되면, Pd가 팽창하면서 격자에 스트레인(strain)이 인가되어 격자의 공진 파장(resonance wavelength)이 이동한다. 한편 광섬유 격자에 WO_3 을 증착시킨 경우에는 WO_3 가 수소와 반응하여 열을 발생시키고, 발생된 열이 격자의 공진 파장을 이동시킨다[5]. 그 외에 측면 연마된 광섬유(side-polished fiber)의 연마면(polished surface)에 Pd 혹은 WO_3 박막 층을 코팅한 구조도 수소를 감지할 수 있는 광섬유 센서부로 사용되어 왔다[7-8]. 특정 파장의 감쇄 골(attenuation dip)을 갖는 측면 연마된 광섬유의 투과 스펙트럼(transmission spectrum)은 연마면에 증착된 Pd 혹은 WO_3 가 수소와 반응할 경우 그 파장 특성이 바뀌게 된다. 즉 앞서 언급된 광섬유 격자 또는 측면 연마된 광섬유 기반 수소 센서는 출력 스펙트럼의 파장 이동이나 파워 변화를 통해 수소 농도를 측정할 수 있다. 그러나 광섬유 격자는 자외선에 장시간 노출시켜 제작되기 때문에 횡축(transverse axis)으로 인가되는 외부 스트레스(stress)에 의해 쉽게 파손될 수 있다. 또한 측면 연마된 광섬유는 광섬유의 클래딩(cladding)을 식각(etching)하여 제작되므로 광섬유의 내구성이 약해지

게 된다.

본 논문에서는 편광 빔 분배기(polarization beam splitter: 이하 PBS), 두 개의 1/4 파장판(quarter-wave plate: 이하 QWP), 그리고 Pd가 코팅된 편광 유지 광섬유(polarization-maintaining fiber: 이하 PMF)로 구성된 편광 상이 배치 구조(polarization-diversity loop configuration: 이하 PDLC) 기반 간섭계(interferometer)[9-10]를 이용하여, 수소 반응 시 출력 간섭 스펙트럼 변화를 통해 수소 농도를 측정할 수 있는 광섬유 수소 센서를 제안하였다. 제안된 PDLC 기반 수소 센서에서 PMF는 편광 간섭(polarization interference)을 구현하기 위한 복굴절 요소(birefringence element)로 사용되었다. 센서부로 사용되는 Pd가 코팅된 PMF가 수소에 노출되면, Pd가 수소와 반응하여 팽창하고 PMF에 스트레인을 인가시켜 PMF의 복굴절을 변화시킨다. 이러한 복굴절의 변화는 센서에서 출력되는 간섭 스펙트럼의 파장을 이동시키므로, 파장 이동량을 측정하여 Pd와 반응한 수소의 농도를 추정할 수 있다[11]. 실험 결과 제안된 수소 센서는 저농도의 수소 환경에서 광섬유 격자 기반의 수소 센서에 비해 좀 더 높은 민감도를 보였는데, 이는 PMF가 광섬유 격자에 비해 스트레인에 대한 민감도가 높기 때문이다[12]. 특히 제안된 센서의 반응 시간을 조사하기 위해, 1~4%의 여러 수소 농도에서 수소 주입 및 제거 시 센서 출력 파워의 시간적인 변화를 조사하였다.

2. 동작 원리

그림 1은 제안된 센서에서 수소 반응 물질인 Pd가 코팅된 PMF의 측면도와 단면도를 보여준다. 본 실험에서 사용된 PMF는 복굴절이 $\sim 3.16 \times 10^{-4}$ 인 팬더형(panda-type) PMF(Thorlabs HB1250T)로 사용된 PMF의 길이는 370mm이었다. Pd는 RF 스퍼터링 방식(sputtering method)에 의해 ~ 400 nm의 두께로 ~ 60 mm 길이 만큼 피복(jacket)이 벗겨진 PMF에 코팅되었다. 제안된 센서 시스템의 개략도는 그림 2와 같고, 상응하는 블록 구조도(block diagram)를 내부 그림에 나타내었다. 제안된 센서 시스템은 광대역 광원

(broadband light source, Fiberlabs FL7004), 광 스펙트럼 분석기(optical spectrum analyzer: 이하 OSA, Yokogawa AQ6370C) 그리고, PDLC 기반 간섭계로 구성된다. 여기서 PDLC 기반 간섭계는 PBS, 두 개의 QWP, 그리고 Pd가 코팅된 PMF로 구성되어 있다.

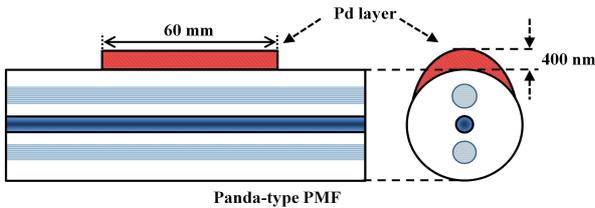


그림 1. Pd가 코팅된 PMF의 측면도와 단면도
Fig. 1. Diagrams of side and cross-sectional view of the Pd-coated PMF

간섭계로 입력되는 빛은 PBS에 의해 서로 직교하는 편광을 가진 두 편광 성분으로 나뉘지고, 각각의 편광 요소들은 광 경로(optical path)를 따라 두 개의 QWP와 PMF를 거쳐 시계 또는 반시계방향으로 순환한다. 먼저 시계방향으로 순환하는 빛은 첫 번째 QWP를 거쳐 PMF에 도달하게 되면 코어(core)의 굴절률이 작은 고속축(fast axis)과 굴절률이 큰 저속축(slow axis)에 대응되는 두 편광요소로 분해된다. 마찬가지로 반시계방향으로 순환하는 빛 또한 시계방향으로 순환하는 빛과 같은 과정을 거친다. 두 편광요소들은 광 경로 순환 후 PMF의 복굴절에 의해(PMF의 주축 기준으로 고려했을 때) 위상차를 갖게 되므로 OSA와 연결된 PBS의 출력부에서 간섭 스펙트럼이 생성된다. 이렇게 생성된 두 간섭 스펙트럼들은 서로 직교하는 편광을 갖기 때문에 간섭계 출력단에서는 서로 더해지게 된다. 다시 말해 시계 방향으로 회전하는 두 편광 성분과 반시계 방향으로 회전하는 두 편광 성분이 각각 PBS 출력부에서 간섭 스펙트럼을 만들고, 두 간섭 스펙트럼이 중첩되어 최종 출력이 결정된다. 따라서 임의의 편광을 가진 빛이 간섭계에 입력되어도 PBS에 의해 회전 방향에 따른 광 파워의 분배만이 달라지고, 간섭계 출력의 광 파워는 변화되지 않는다. 즉 PDLC 기반 간섭계는 입력 편광에 무관한 간섭 스펙트럼을 출력시킨다[9-10].

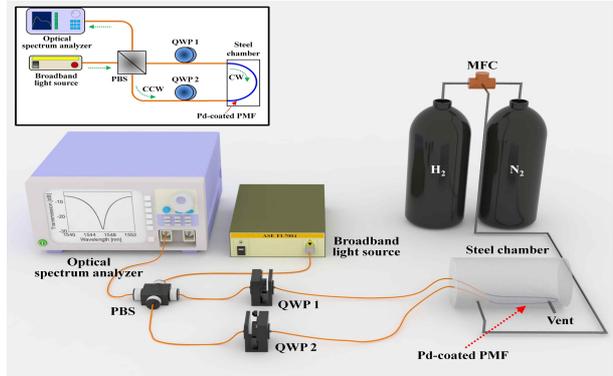


그림 2. 제안된 수소 센서 시스템의 개략도(내부 그림은 제안된 수소 센서 시스템의 블록 구조도를 나타냄)
Fig. 2. Schematic diagram of the proposed hydrogen sensor system (Inset shows its block diagram)

간섭 스펙트럼의 가시도(visibility)는 두 QWP에 의해 최적화될 수 있고, 간섭 패턴의 간격(fringe spacing)은 PMF의 길이와 복굴절에 의해 결정된다. 센서부인 Pd 코팅된 PMF는 수소와 질소를 주입할 수 있는 스테인레스 스틸(stainless steel) 재질의 챔버(chamber) 내부에 위치하고 있다. 여기서 질소는 안정화 가스로 사용되었고, 챔버 내 가스 흐름은 가스 조절기(mass flow controllers: 이하 MFCs)에 의해 조절되었다[13]. 또한 챔버 내에 주입된 가스가 Pd 코팅된 PMF에 직접 닿을 경우 발생 가능한 부차적인 영향을 최소화하고, 센서부를 안정적으로 고정시키기 위해 보조적인 구조물을 챔버 내부에 삽입하였다. 수소가 챔버 내부에 주입되면 Pd가 팽창하게 되고, 이로 인해 광 섬유에 스트레인이 인가되어 Pd가 코팅된 PMF의 복굴절을 변화시키게 되며, 이는 결국 제안된 센서의 출력 간섭 스펙트럼을 변화시키게 된다. 즉 Pd가 코팅된 PMF는 수소와 반응 시 출력 간섭 스펙트럼의 파장을 변화시키는 트랜스듀서(transducer) 역할을 한다. 더욱이 광원의 출력 파워가 파장 별로 균일하지 않을 경우, 간섭계 자체의 투과 스펙트럼 변화는 센서의 출력 파워에 상당한 변화를 가져온다. 따라서 제안된 센서 시스템은 상기 언급된 출력 간섭 스펙트럼의 파장 이동이나 광 파워의 변화를 통해 수소 누출 여부를 알 수 있고, 누출된 수소의 농도 또한 추정할 수 있다.

3. 실험 결과

제안된 센서를 이용한 수소 농도 측정 실험은 챔버 내부의 수소 농도가 0%일 때부터 1, 2, 3, 4%의 수소 농도를 가질 때의 스펙트럼을 각각 측정하는 방식으로 수행되었다. 먼저 챔버에 질소만을 가득 채워 챔버 내부의 수소 농도를 0%로 만든 후 출력 스펙트럼을 측정하였다. 그리고 스펙트럼 측정 후에 챔버를 개방하여 챔버 내부의 가스를 모두 제거한 뒤, 다시 수소를 주입하여 챔버 내부의 수소 농도가 1%가 되었을 때 변화된 출력 스펙트럼을 측정하였다. 동일한 방법으로 챔버 내부의 수소 농도를 1% 간격으로 4%까지 변화시키며 각각의 출력 스펙트럼을 측정하였고, 수소를 주입하고 제거하는 측정 간격 마다 질소를 이용하여 챔버 내부를 정화시켰다. 그리고 측정 시 챔버 내부에 주입된 수소 가스의 안정화를 위해 수소 가스를 주입하고 3분이 경과한 뒤 스펙트럼을 측정하였다. 그림 3 (a)는 상온에서 수소 농도가 1~4%로 변할 때 제안된 센서에서 측정된 출력 투과 스펙트럼의 변화를 보여 준다. 전술했듯이 제안된 센서의 출력 간섭 스펙트럼은 편광 간섭에 의해 만들어진다. 그림에서 챔버 내부에 수소를 주입하지 않아 수소 농도가 0% 일 때의 스펙트럼을 살펴보면, 간섭 스펙트럼 골의 파장은 ~1546.77nm이었고, 투과도(transmittance)는 약 -28.38dB이었다. 이후의 측정에서는 이 스펙트럼 골을 센서 표지자(sensor indicator)로 사용하였다. 챔버 내부의 수소 농도가 0%에서 4%로 증가할 때, 스펙트럼의 골은 단파장 쪽으로 ~2.48nm 만큼 이동하였고, 투과도는 ~3.25dB 만큼 증가하였다.

그림 3 (b)는 수소 농도가 0%일 때 센서 표지자로 선택된 스펙트럼 골의 파장과 투과도를 참조점(reference point)으로 정할 경우, 수소 농도가 변화될 때 센서 표지자의 변화되는 파장과 투과도를 나타내고 있다. 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 때, 센서 표지자로 사용된 골의 파장은 각각 ~0.34, ~1.51, ~2.38, ~2.48nm만큼 이동하였고, 골의 투과도는 각각 ~0.13, ~1.72, ~2.06, ~3.25dB만큼 변화하였다. 여기서 수소 농도가 4%에 도달할 경우 파장 이동이 현저히 줄어드는 것을 알 수 있는데, 이는 Pd가 수소를 충분히 흡수

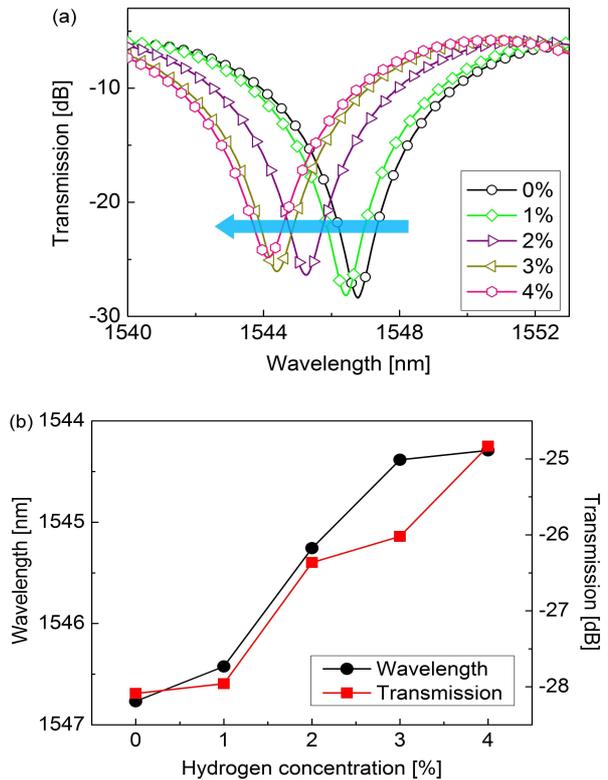


그림 3. (a) 상온에서 수소 농도가 변할 때 제안된 센서를 사용하여 측정된 출력 스펙트럼과 (b) 센서 표지자로 사용된 골의 파장 이동과 투과도 변화

Fig. 3. (a) Measured output spectrum of the proposed sensor for various hydrogen concentrations at room temperature and (b) wavelength shift and transmission change of the transmission dip (the sensing indicator)

하여 팽창 속도가 현저히 감소하기 때문으로 보여진다. 출력 간섭 스펙트럼에서 센서 표지자로 사용된 골 외의 다른 골들을 살펴보면, 수소 농도에 따라 파장이 이동하는 경향은 거의 유사하였으나, 수소 농도에 따른 투과도의 변화량은 각각 달랐다.

실험에 사용된 가장 낮은 수소 농도는 1%이었고, 제안된 센서가 1%의 수소 농도에 대해 측정 가능한 파장 이동 반응을 보이므로 누출된 수소를 초기에 탐지할 수 있는 가능성을 보여준다. 모든 실험은 상온에서 진행되었고, 2%이하의 낮은 수소 농도 측정 시에는 이력현상(hysteresis)이 거의 관측되지 않았다. 제안된 센서에서 정적 스펙트럼 반응(static spectral

response)의 온도 의존성을 시험해 보기 위해, 60 및 90°C와 같은 상온과 다른 온도에서 동일한 수소 농도 측정 실험을 수행하였으나, 측정된 파장 이동량에서 큰 변화는 발견되지 않았다. 스트레인에 의한 복굴절 변화는 온도에 의한 복굴절 변화와 구분될 수 있기 때문에[12], 실제 센서부의 온도 변화는 PMF 복굴절의 스트레인 민감도에는 거의 영향을 미치지 않는다.

특히 다양한 수소 농도에 대해 센서 출력 파워의 반응 시간을 측정하기 위해 그림 2의 센서 시스템 개략도에서 OSA 대신 광 세기 측정기(optical powermeter, HP 8153A)를 연결하였다. 그림 4 (a)는 실험에서 사용된 광대역 광원의 증폭 자발 방출 (amplified spontaneous emission) 스펙트럼을 1,520~1,620nm의 파장 범위에서 측정한 결과이고, ~100nm의 파장대역에서 100 μ W 이상의 출력 파워 변화를 보이는 매우 불균일한 출력 파워 분포를 갖는다는 것을 알 수 있다. 그림 4 (a)의 내부 그림은 간섭 패턴을 보이는 센서의 출력 투과 스펙트럼을 ~40nm의 파장 범위에서 측정된 결과를 보여주고 있으며, 간섭 스펙트럼의 파장 간격은 ~13.5nm로 측정되었다. 만약 광원의 출력 파워가 전 파장 대역에서 하나의 상수값을 가지면, 수소 반응에 의한 간섭계의 투과 스펙트럼 이동 시 센서 출력 파워의 변화가 없지만, 상기 언급했듯이 본 실험에 사용된 광대역 광원의 경우 파장별로 매우 불균일한 출력 파워 분포를 가지므로, 간섭계 투과 스펙트럼의 파장 이동은 제안된 센서의 출력 광 파워를 변화시키게 된다.

그림 4 (b)는 수소 농도를 1%에서 4%까지 점진적으로 증가시키면서 측정한 센서 출력 파워의 과도 변화를 보여주고 있다. 그림에 보이는 네 개의 산(peak) 형태의 곡선은 왼쪽부터 순서대로 챔버 내부의 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 경우 센서 출력 파워의 과도 반응에 해당한다. 그림에 표시된 'Gas IN'과 'Gas OUT'은 각각 챔버 내부에 수소가 주입되었을 때와 제거되는 순간을 지칭한다. 그림에서 알 수 있듯이 챔버 내부로 수소가 주입되거나 내부의 수소가 제거되면 그 순간 센서의 출력 파워가 각각 상승하거나 하강하는 반응을 보인다. 편의상 상승시간은 수소 주입에 의해 출력 파워가 증가하기 시작하여 포화될 때까지 소요되는

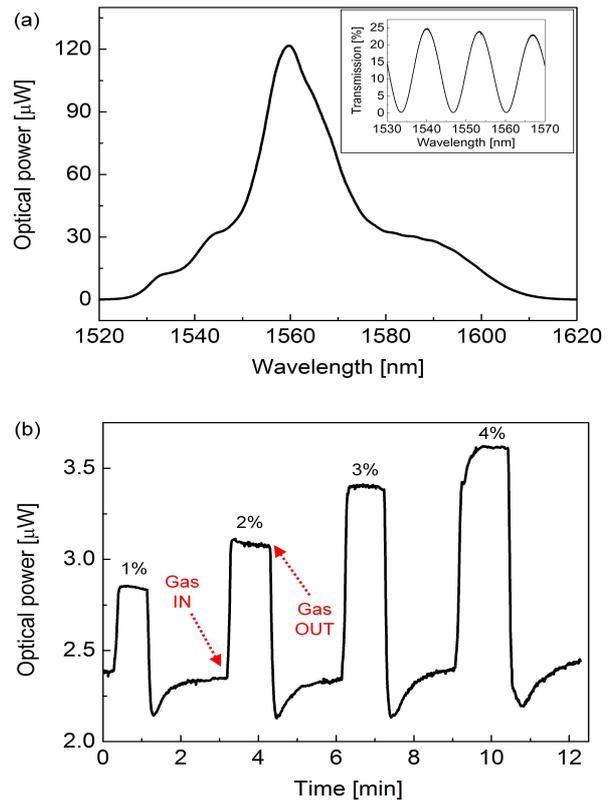


그림 4. (a) 실험에 사용된 광대역 광원의 출력 스펙트럼과 센서의 출력 투과 (간섭) 스펙트럼 (내부그림) (b) 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 때 측정된 센서 출력 파워의 과도 변화

Fig. 4. (a) Output spectrum of broadband light source used in our experiment and output transmission (interference) spectrum of sensor (inset) (b) Transient variation of sensor output power measured at hydrogen concentrations of 1, 2, 3, and 4%

시간으로 정의하고, 하강시간은 포화된 출력 파워가 최소값에 도달하는데 소요되는 시간으로 정의한다. 상승 및 하강시간은 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 때, 각각 ~10.5 및 ~10.0초, ~10.4 및 ~10.5초, ~12.5 및 ~11.0초, ~25.9 및 ~21.4초로 측정되었다.

수소 농도가 4%일 때를 제외하면 센서의 반응 시간 (상승 및 하강시간)은 농도에 크게 의존하지 않는 것으로 보인다. 수소 농도가 4%인 경우에는 Pd가 수소를 충분히 흡수한 상태이므로, Pd 부피의 초과 변화에 더 많은 시간이 소요되는 것으로 생각된다. 특히 챔버

내부의 수소가 제거될 때, 센서의 출력 파워가 안정화 되기 위해서는 60초 이상의 상당히 긴 시간이 필요하다는 것을 주목할 필요가 있다. 이러한 안정화 시간은 수소가 제거되면서 인장된 광섬유와 팽창된 Pd가 원래의 형태로 복구될 때 수반되는 완화 현상(relaxation phenomenon)에 의해 발생하는 것으로 보인다. 추가적으로 수소 농도의 증가와 함께 출력 파워도 증가하는 것이 관찰되는데, 네 개의 산에서의 출력 파워 평균은 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 때 각각 ~2.85, ~3.09, ~3.40, ~3.61 μ W로 측정되었다. 그러나 이러한 스펙트럼 산 위치에서의 광 파워는 광원의 광 파워 분포 균일성에 크게 의존하기 때문에 항상 수소 농도에 비례하지는 않는다.

4. 결 론

요컨대 본 논문에서는 PBS, 두 개의 QWP, 그리고 Pd가 코팅된 PMF를 사용하여 광섬유 수소 센서를 제안하였고, 실험을 통해 제안된 센서의 성능을 조사하였다. 수소 농도가 1, 2, 3, 4%일 때, 센서 표지자로 사용된 참조 스펙트럼으로부터의 파장 이동량은 각각 ~0.34, ~1.51, ~2.38, ~2.48nm로 측정되었다. 반응 시간은 수소 농도가 4%일 때를 제외하면 10~12.5초로 측정되었고, 이는 수소 농도에 대해 영향을 받지 않는다는 것을 확인하였다. 광섬유 격자 기반의 다른 광섬유 수소 센서들과 비교해 볼 때, 제안된 센서는 PMF 복굴절의 스트레인에 대한 민감도가 더욱 높기 때문에 낮은 수소 농도에서 향상된 민감도를 보였다. 특히 제안된 센서는 센서부로 사용된 PMF가 물리적 또는 화학적 침습 과정을 거치지 않았기 때문에, 측면 연마된 광섬유나 광섬유 격자 기반의 광섬유 수소 센서에 비해 내구성이 강하다. 더불어 제안된 센서 시스템은 앞서 언급된 여타 광섬유 수소 센서에 비해 시스템 구성 및 제작이 비교적 간단한 장점을 갖는다.

감사의 글

본 논문은 교육과학기술부의 재원으로 지원을 받아 수행된 산학협력 선도대학(LINC) 육성사업의 연구결과입니다.

References

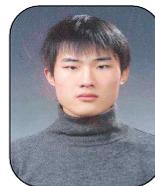
- [1] B. Sutapun, M. Tabib-Azar and A. Kazemi, Sens. Actuators B 60, 27 (1999).
- [2] M. Buric, K. P. Chen, M. Bhattarai, P. R. Swinehart and M. Maklad, IEEE Photon. Technol. Lett. 19, 255 (2007).
- [3] X. Wei, T. Wei, H. Xiao and Y. S. Lina, Sens. Actuators B 134, 687 (2008).
- [4] C.-L. Tien, H.-W. Chen, W.-F. Liu, S.-S. Jyu, S.-W. Lin and Y.-S. Lin, Thin Solid Films 516, 5360 (2008).
- [5] C. Caucheteur, M. Debligny, D. Lahem and P. Mégret, IEEE Photon. Technol. Lett. 20, 96 (2008).
- [6] C. E. Garrett and K. Prasad, Advanced Synthesis and Catalysis 346, 889 (2004).
- [7] K. T. Kim, H. S. Song, J. P. Mah, K. B. Hong, K. Im, S.-J. Baik and Y.-I. Yoon, IEEE Sens. J. 7, 1767 (2007).
- [8] M. Yang, H. Liu, D. Zhang and X. Tong, Sens. Actuators B 149, 161 (2010).
- [9] Y. W. Lee, K. J. Han, B. Lee and J. Jung, Opt. Express 11, 3359 (2003).
- [10] Y. W. Lee, K. J. Han, J. Jung and B. Lee, IEEE Photon. Technol. Lett. 16, 2066 (2004).
- [11] Y. Kim, T. K. Noh, W. Jang and Y. W. Lee, in Proceedings of 17th Opto-Electronics and Communications Conference, OECC 2012 (Busan, Korea, July 2-6, 2012).
- [12] G. Sun, D. S. Moon and Y. Chung, IEEE Photon. Technol. Lett. 19, 2027 (2007).
- [13] J. Villatoro and D. Monzón-Hernández, Opt. Express 13, 5087 (2005).

◇ 저자소개 ◇



노태규 (盧泰奎)

1988년 9월 28일생. 2012년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 현재 부경대학교 전기공학과 대학원 재학(석사과정).



김영호 (金榮虎)

1986년 8월 8일생. 2011년 8월 부경대학교 전기공학과 졸업. 현재 부경대학교 전기공학과 대학원 재학(석사과정).



이용욱 (李鎔旭)

1975년 4월 25일생. 1998년 서울대학교 전기컴퓨터공학부 졸업. 2000년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(석사). 2004년 서울대학교 대학원 전기컴퓨터공학부 졸업(박사). 현재 부경대학교 전기공학과 부교수.